

急勾配斜面による波の反射に関する基礎的研究

相 馬 英 敏*
 石 塚 耕 一**
 近 藤 俣 郎***

A Basic Study on the Wave Reflection caused by the Steep Slope Structure

Hidetoshi SÔMA
 Kôichi ISHIZUKA
 Hideo KONDO

要 旨

本論文は、急勾配斜面による波の反射率におよぼす諸要素について実験的に研究したものである。

Symopisis

In this paper, we studied accoring to the experiments on the various elements to affect the wave reflection cofficient caused by the steep slope structure.

1. ま え が き

わが国の海岸侵食が問題にされ始めたのはごく最近のことであり、侵食の原因としては大小さまざまな要素が考えられるが、現地における汀線の変化を直接支配するものは波の力であり、このほか直接要因として潮汐や潮流・海流および沿岸流の作用、あるいは地震・津波・地盤沈下などが考えられる。海岸侵食には地形的に見ると、海食崖、浜崖、汀線の後退、前面海浜・海底の洗掘などがあり、その防止工法として原因追究をし、海岸護岸、海岸堤防などが改良されている^{1),2)}。直接支配要因である波の力、つまり波動エネルギーとそれを媒体とする波の打上げ・越波および反射の相互の関連性を追究することは、重要なことと考えられる。この中で波の反射は、入射波の残留エネルギーが沖へ伝達される現象であり、そのエネルギーの規模により侵食のそれも変化すると考えられる。そこで、1953年、J. J. Healyが開発した反

射率の算出法を使って、反射率の実測によって定量的に波動エネルギーの消波効率は把握できると考えられる。また理論的にはMicheにより波の反射率は、のり面勾配 θ 、補正係数(不透過面の粗滑による) ρ と入射波波形勾配 H_i/L_i の関数であると報告されている。また日本でも、これらの関連性を追究する研究も数多く報告されている。^{3),4),5)}そこで著者等は、簡単な不透過性反射板を使用して波の打上げ、反射に影響を及ぼすと考えられる斜面のり面勾配、波形勾配、反射板の粗滑・断面形状などの諸要素について実験的に研究を試みた。

2. 実 験 設 備

実験は長さ19.7 m、幅0.9 m、高さ1.0 mのペンデュラム式造波装置が設置されている両面ガラス張りの二次元規則波造波水槽で水平底にして行なわれた。波高の測走は、容量式波高計を使用し、水位計増幅器(計測技研㈱製)を通して、6チャンネルのリニアコーダ(波辺測器㈱製)に記録させることで行なった。図-1に実験造波水槽側面図を示す。また実験に使用した模型反射板は、次の3種類でありいずれも不透過反射板であり、水路後端付近に設置した。

* 助手 土木工学科

** 教授 土木工学科

*** 教授 室蘭工業大学 土木工学科

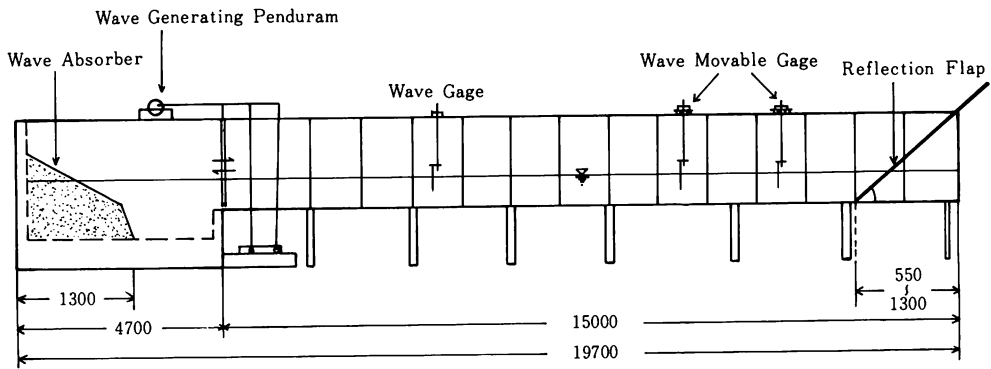


図-1 実験造波水槽側面図

(寸法単位:mm)

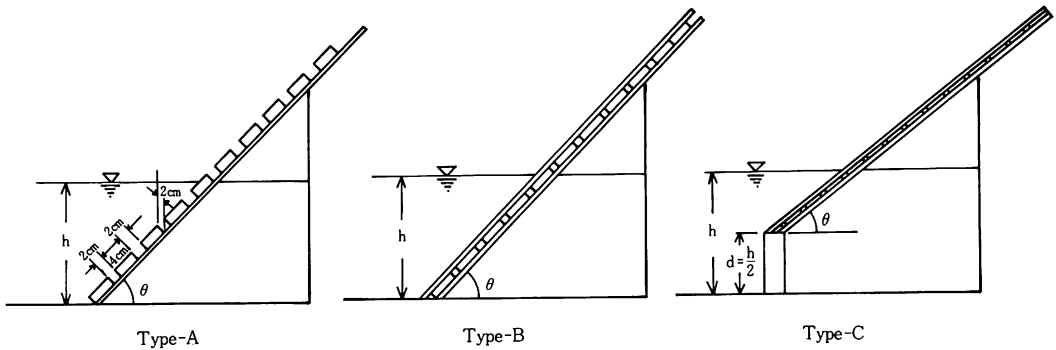


図-2 模型反射板略図

Type-Aとして、平滑な不透過板の上に断面 $2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ の鋼材が、波の進行方向に直交するようにこの不透過板に 2 cm の間隔で規則正しく取り付けられた粗面反射板である。

Type-Bとして、Type-Aの反射板にペンキ塗り仕上げの合板をはりつけた滑面反射板である。

Type-Cとして、Type-Bの反射板を使用して、 $d = h/2 = 15\text{ cm}$ の直立部を有する断面形の反射板である。

これらの反射板は、それぞれ漏水のないようパテなどを使用して設置し、実験を行なった。図-2は、各々の反射板の断面略図である。

3. 実験方法

実験は図-1に示すように、実験装置・反射板を設置し、一様水深 $h = 30\text{ cm}$ として、反射板は波が越波しないよう十分長いものを使用した。

実験に使用した入射波は、周期 $T = 1.1 \sim 1.9\text{ sec}$ まで 0.1 sec 刻みに9種類、入射波高 $H_I = 2.5 \sim 15\text{ cm}$ である。また反射板ののり面勾配 θ は、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° と7種類変化させた。

3.1 反射率の測定方法

模型反射板による反射率は、次に述べる Healy の方法により計算した。

3.1.1 Healy の方法⁶⁾

今、入射波および反射波の波形を正弦波形とする。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \eta_I &= \frac{1}{2} H_I \cos(kx - \sigma t) \\ \eta_R &= \frac{1}{2} H_R \cos(kx + \sigma t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 H_I, H_R は入射波高、反射波高で、 $k = 2\pi/L$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ で、 $x = 0$ を反射面とする。この2つの波が重ね合わされると

$$\eta = \eta_I + \eta_R = \frac{1}{2} (H_I - H_R) \cos(kx - \sigma t) + H_R \cos kx \cos \sigma t \quad (2)$$

となり、波高が $H_I - H_R$ の進行波と、波高が $2 H_R$ の定常波の合成と見ることができる。

この式をさらに書き直すと

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{1}{2}(H_I + H_R) \cos kx \cos \alpha \\ &+ \frac{1}{2}(H_I - H_R) \sin kx \sin \alpha \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{H_I^2 + 2H_I H_R \cos 2kx + H_R^2} \cos(\alpha - \theta) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{(H_I - H_R) \sin kx}{(H_I + H_R) \cos kx} \right\}$$

この式から、振幅が $\cos 2kx$ の関数として変化していることがわかり、極大および極小波高、 H_{max} 、 H_{min} はこの式より

$$\left. \begin{aligned} H_{max} &= H_I + H_R & : x &= nL/2 \\ H_{min} &= H_I - H_R & : x &= (2n+1)L/4 \\ & & n &= 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

と求められる。

式(4)より、入射波高 H_I 、反射波高 H_R は、

$$\begin{aligned} H_I &= \frac{1}{2}(H_{max} + H_{min}) \\ H_R &= \frac{1}{2}(H_{max} - H_{min}) \end{aligned} \quad (5)$$

と求められ、 H_R と H_I との比を反射率 K_R と定義して、

$$K_R = \frac{H_R}{H_I} = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \quad (6)$$

となり、 H_{max} 、 H_{min} を測定し求めることにより、反射率は算出できる。

3.1.2 実験方法

本実験では、次の様な方法で H_{max} 、 H_{min} を測定した。理論的には、極小・極大波高は、反射壁面より $L/4$ 、 $L/2$ 地点で起こるが、実験水槽などでは、内部粘性摩擦、底面および側壁の摩擦および水の表面のよごれによる表面摩擦などにより必ずしもその地点に H_{max} 、 H_{min} が起こらないと思われるので、反射板の前方に取り付けた1～2台の容量式波高計により、反射板前方の波高分布を10 cm 間隔で一波長+50 cm ぐらいの距離にわたり測定し、 H_{max} 、 H_{min} の起こる地点を確かめ、可動にした波高計を有効測定時間中その地点で前後20 cm ぐらい連続して動かし測定した。

なお測定上、次の事には充分注意をはらった。

- ① 極小波高を正確に補える。
- ② 極大・極小波高がそれぞれ $\frac{1}{2}$ 波長間隔で現われても、その値が必ずしも一定でない場合は、 H_{max} 、 H_{min} のとり方としては、模型から2波長程度以内における最大の極大値、最小の極小値を用いる。

3.2 波の打上げ高の測定方法

波の打上げ高についての実験は、Type-B、Cの滑面反射板について行なった。ここでは、反射板壁面を最高に昇りきった瞬間の打上げ高を対象とし、打上げ高は、静水面からの高さ R で示し、深水波の波高 H_0 に対する相対打上げ高 R/H_0 で表わすことにした。なお、深水波の波高 H_0 は、測定された入射波高 H_I を微小振幅波理論より次式により換算し求めた。

$$H_0 = H_I / K_s \quad (7)$$

ここに、 K_s は浅水係数⁷⁾である。波の打上げ高の実験は、天端高を十分高くし、越波させないようにして、有効測定時間中の波の第4～8波の5波の平均値を採用した。打上げ高 R の測定は、波が斜面上を最高に遡り上がった瞬間を目測によって捕え、各波ごとにマークして測定し、それらの点を静水面上からの鉛直高さに換算して求めた。また、あらかじめ反射板設置付近の両側のガラスに正方眼のグラフを書いておき、波が斜面上を最高に遡り上がった瞬間の波形および波が入射する時の入射波形も同時に測定することとした。

4. 実験結果とその考察

4.1 反射率 K_R について

粗面反射板(Type-A)と滑面反射板(Type-B、C)による反射の実験結果から、入射波波形勾配 H_I/L_I をパラメーターにして反射率 K_R を整理したのが、図-3、図-4、図-5である。

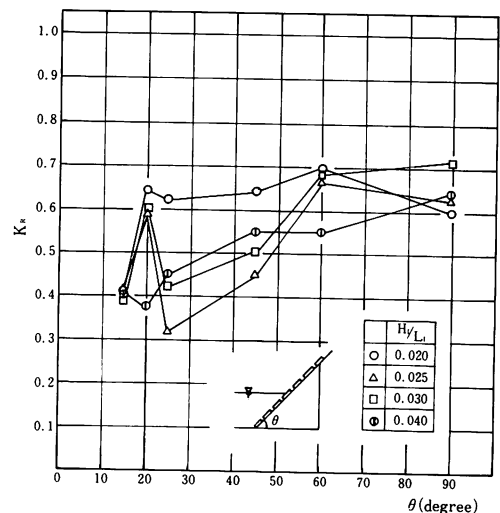


図-3 反射率と入射面勾配の関係 (Type-A)

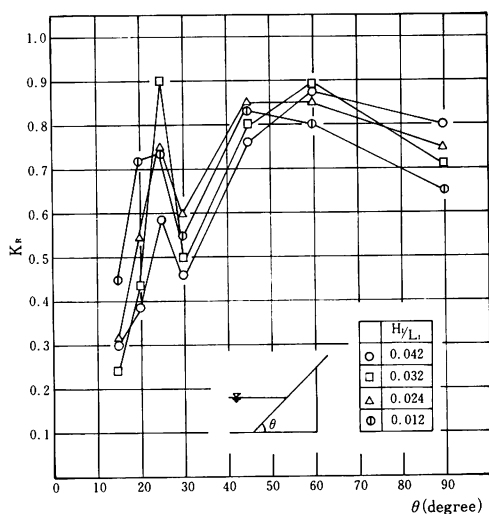


図-4 反射率とのり面勾配の関係 (Type-B)

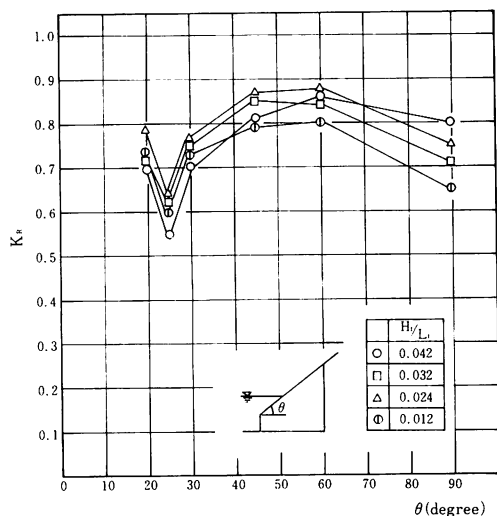


図-5 反射率とのり面勾配の関係 (Type-C)

図-3は、反射板がType-Aのときの結果である。この図から、 $H/L_I = 0.025, 0.030$ の時、 K_R は $\theta = 25^\circ$ で極小値をとり、 $\theta = 20^\circ$ で急増し、 $\theta < 20^\circ$ で急減する傾向が明確に認められる。また、 $H/L_I = 0.020$ の時、 K_R は $\theta = 20^\circ$ 付近で極小値をとることがわかる。全般的に H/L_I による K_R の値は、のり面勾配 θ に対して、 $20^\circ < \theta < 30^\circ$ 付近で特徴のある傾向を示すようであり、 $H/L_I = 0.025 \sim 0.030$ の時に、 θ に対して K_R は大きく変化するようである。また $\theta < 20^\circ$ になると K_R は、 H/L_I によらず一定の値になる傾向を示すようである。

図-4は、反射板がType-Bのときの結果であ

る。この図から、 H/L_I の値によらず K_R は、 $\theta = 30^\circ$ で極小値、 $\theta = 25^\circ$ で極大値を持つことがはっきりと認められ、 $\theta < 25^\circ$ で K_R は、急減することがわかる。

図-5は、反射板がType-Cのときの結果である。この図からも K_R は、 $\theta = 25^\circ$ で極小値を持つ傾向があるようであり、 H/L_I 、 θ の値によらず K_R は、ほとんど一定の値を示すように思われ、Type-A,Bに比較して K_R は、 θ の値にあまり関係せず、一般に大きな値を示すようである。また、これらの図より反射板の粗滑による K_R の効果は、粗面の方が滑面より全般的に小さな値を示し、これは粗面による波動エネルギーの消耗、逸散などによると思われる。また、反射板の断面形状による効果は、図-4, 5より $20^\circ \sim 30^\circ < \theta$ の時顕著に表われていることがわかる。また、のり面勾配 $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ で反射率が、極値を持つ傾向にある理由を考えてみる。ここで、波が斜面上で砕けるかどうかを決する一つのパラメータとして、のり面勾配 θ と波形勾配 H/L の関数で表示され次式で示される ξ を考える⁸⁾。

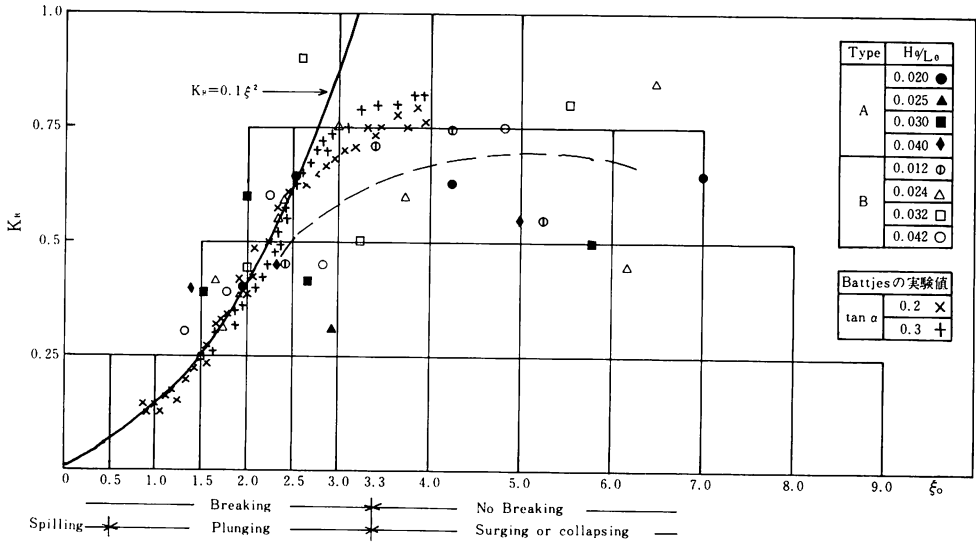
$$\xi = \tan \theta / (H/L)^{1/2} \quad (8)$$

ここで、深海波に対して扱うとき、指標として“ σ ”をつけて表わすものとする。

ξ の値により斜面上で波が砕ける時、碎波の形状は次のように分類される。

$$\begin{aligned} \xi > 3.3 & \text{ Surging or Collapsing Breaker} \\ 0.5 < \xi < 3.3 & \text{ Plunging Breaker} \\ \xi < 0.5 & \text{ Spilling Breaker} \end{aligned} \quad (9)$$

実験結果を H_o/L_o をパラメーターにして、横軸に ξ_o をとり K_R を整理⁹⁾したのが図-6である。この図から、 $0.5 < \xi_o < 3.3$ のとき、つまり緩勾配の場合、 K_R は放物線 $K_R = 0.1 \xi_o^2$ の曲線にほぼ一致するように大きくなる。そして、波はPlunging Breakerと考えられ、これが反射波に影響を及ぼし K_R が大きく表われる理由と考えられる。また、 $\xi_o > 3.3$ のとき、つまり急勾配になると、 K_R は上に凸の放物線を示すようになり、その値も小さくなることがわかる。そして、波はNo Breakingと考えられる。つまり、これから斜面上で碎波するようなのり面勾配で K_R は異常に大きくなり、そののり面勾配を前後に漸減すると考えられる。


 図-6 反射率と ξ の関係

4.2 打上げ高について

反射板が Type-B, Type-C の時, 相対打上げ高 R/H_0 とのり面勾配 θ との関係を波形勾配 H_0/L_0 をパラメーターにして整理したのが図-7, 図-8 である。図-7 は, 反射板が Type-B のときの結果である。この図から, $\theta=20^\circ \sim 25^\circ$ で R/H_0 は, 極大値をもつことがわかり, こののり面勾配を境に R/H_0 は急減する傾向が認められる。また, R/H_0 が極大値をとる θ の値は, 次式の Miche の式¹⁰⁾により求められる θ_c の値とよく一致するようである。

$$\frac{H_0}{L_0} = \sqrt{\frac{2\theta}{\pi}} \cdot \frac{\sin^2 \theta}{\pi} \quad (10)$$

この式 (10) で, 任意の H_0/L_0 に対して求める θ の値を, Surging waves を生ずる最緩傾斜角 θ_c と表わす。ここで, (10) 式より, $H_0/L_0=0.042, 0.032, 0.024, 0.015$ に対する θ_c を求めると, それぞれ $\theta_c=29^\circ, 26^\circ, 23^\circ, 19^\circ$ となる。また, H_0/L_0 による R/H_0 の特性は, この結果からははっきり定性することはできないが, $\theta < 25^\circ$ で H_0/L_0 が小さいほど R/H_0 は大きいようである。図-8 は, 反射板が Type-C のときの結果である。この図から $\theta=30^\circ$ 除き H_0/L_0 によらず R/H_0 の値は, 同一ののり面勾配では近似しているようであり, $\theta=25^\circ \sim 30^\circ$ で R/H_0 は極大値をもつ傾向が見られるが, 図-7 のように顕著には表われていない。これらの図より, Type-C つまり直立部を有する断面形の方が一般

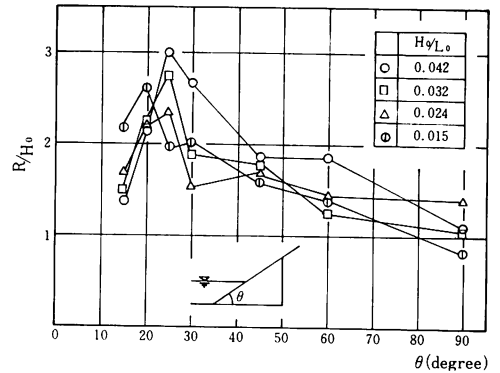


図-7 相対打上げ高とのり面勾配の関係 (Type-B)

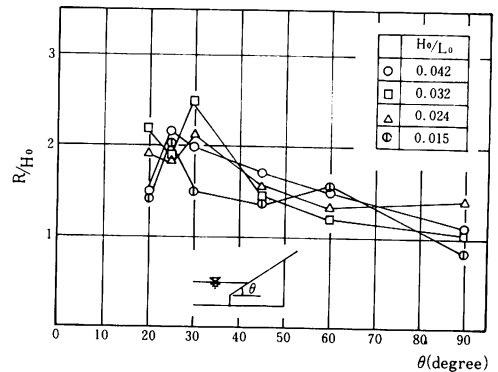


図-8 相対打上げ高とのり面勾配の関係 (Type-C)

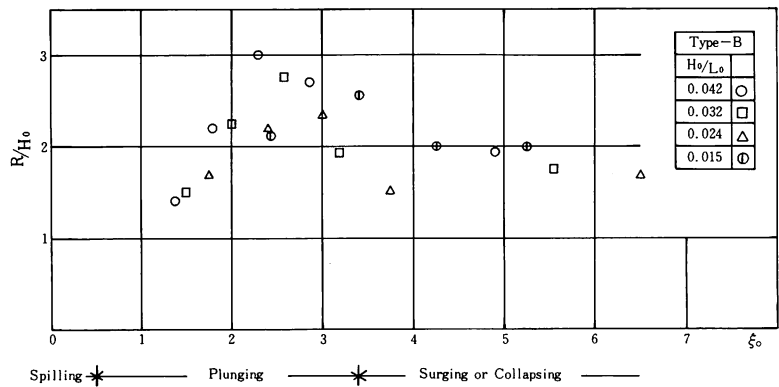


図-9 相対打上げ高と ξ の関係

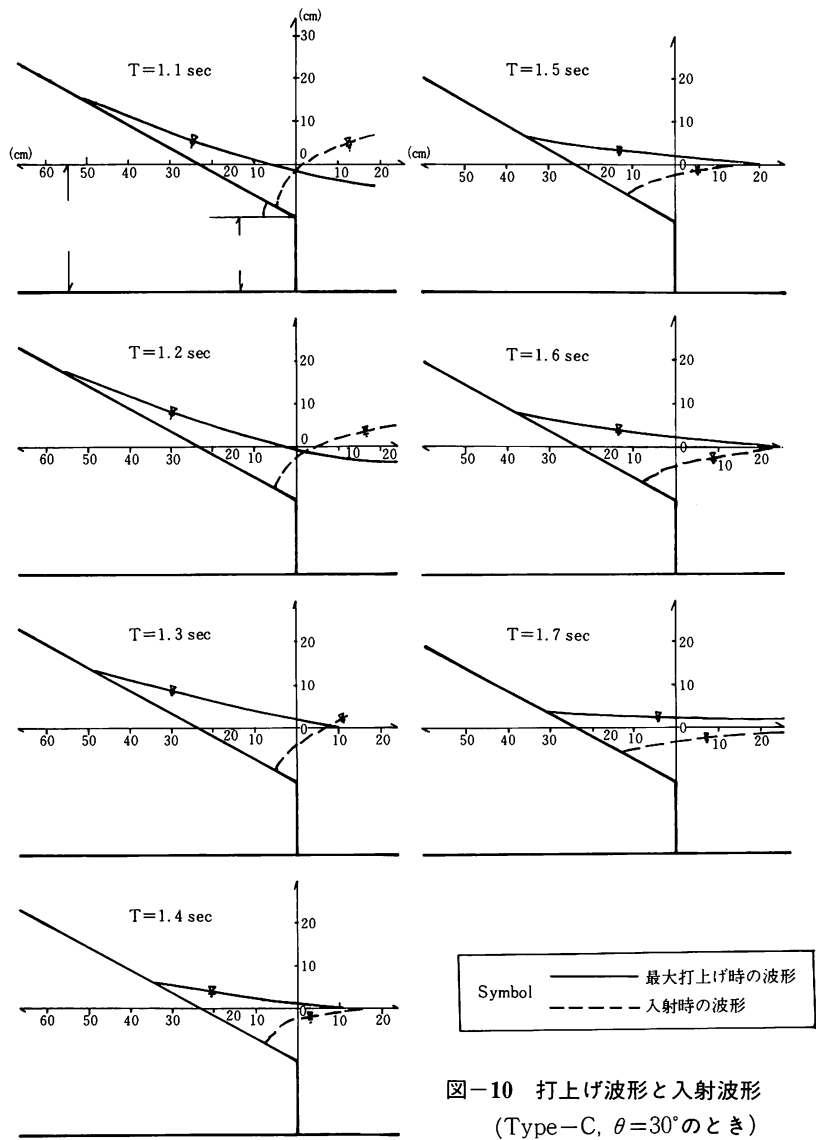
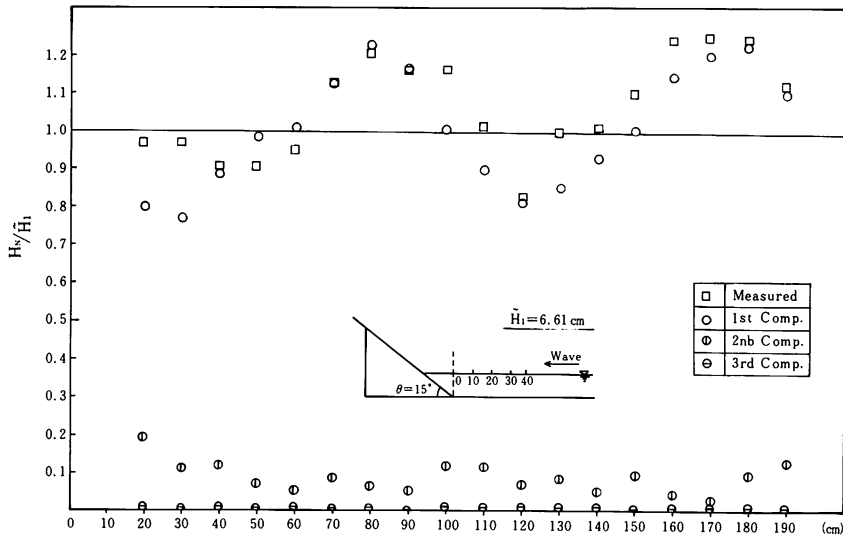


図-10 打上げ波形と入射波形
(Type-C, $\theta=30^\circ$ のとき)


 図-11 波高分布 (Type-B, $\theta=15^\circ$, $T=1.1$ Sec のとき)

に R/H_0 は小さいようでありその効果とも思われる。また、相対打上げ高 R/H_0 と ζ_0 との関係は H_0/L_0 をパラメーターにして整理したのが図-9である。この図から、Plunging Breaker となる $0.5 < \zeta_0 < 3.3$ の範囲で R/H_0 は、大きくなる傾向が認められ、斜面上で碎波を生ずる θ の値で R/H_0 は大きくなると考えられる。図-10は、Type-C, $\theta=30^\circ$ の時、 $T=1.1 \sim 1.7$ sec の波の最大打上げ時の波形と入射波形を表わしたものである。この図より、短周期の波ほど入射波は反射板の面に直角に入射することがわかり、碎波して打上げ高も大きくなると考えられる。

4.3 波高分布について

本実験を行なうに当り全ての実験波に対し、波高を一定間隔 (10 cm) で測定して波高分布を調べた。その結果、高調波の影響と思われる波高分布に凹凸を生じ、理論的ななめらかな曲線を示さないことがわかった。そこで、各地点における波の変形は、記録紙上の一周期間の時間波形を 24 等分した時間間隔で読み取ったものを調和解析¹¹⁾した。その際、波形は三倍周数波までの三成分の合成波で表現することとし、各周波数ごとの波高 H_N ($N=1, 2, 3$) を入射波における基本周波数の波高 H_1 で除した無次元波高で表現することにした¹²⁾。波形を三成分の合成波で数式表現すると次のようになる。

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \frac{\pi t}{p} + a_2 \cos \frac{2\pi t}{p}$$

$$\begin{aligned} &+ a_3 \cos \frac{3\pi t}{p} + b_1 \sin \frac{\pi t}{p} \\ &+ b_2 \sin \frac{2\pi t}{p} + b_3 \sin \frac{3\pi t}{p} \end{aligned} \quad (11)$$

 表-1 Healy の方法による K_r と調和解析後の一次成分波による K_r

Type	θ (°)	T (sec)	Healyの方法 による K_r	一次成分波 による K_r
C	60	1.4	0.814	0.600
		1.5	0.809	0.780
		1.6	0.874	0.847
		1.7	0.832	0.692
		1.8	0.841	0.790
		1.9	0.825	0.800
	45	1.1	0.814	0.774
		1.2	0.850	0.699
		1.4	0.807	0.677
		1.5	0.779	0.575
		1.6	0.755	0.742
		1.7	0.746	0.623
		1.8	0.870	0.753
		1.9	0.856	0.814
	25	1.3	0.743	0.686
		1.4	0.816	0.648
		1.7	0.803	0.671
		1.9	0.805	0.703
	15	1.1	0.291	0.230

図-11 は、その一例で Type-B の反射板、 $\theta=15^\circ$ 、 $T=1.1 \text{ sec}$ 、 $H_1=6.61 \text{ cm}$ の波の波高分布の結果を、およそ一波长にわたり表わしたものである。この図より、どの地点においても、二次成分波が三次成分波よりも大きく表わしていることがわかり、これが実測の波高分布の凹凸に影響していると思われる。この時の二次成分波、三次成分波の $H_N/\bar{H}_1$ の大きさの範囲は、 $0.02 < H_2/\bar{H}_1 < 0.15$ 、 $0.1 < H_3/\bar{H}_1 < 0.04$ である。また、この時の反射率 K_R の実験値は、Healy の方法より $K_R=0.281$ と求められ、高調波の影響と無視し一次成分波の反射率を求めると $K_R=0.230$ となり実験値は大きめに求められていて、二次波の影響と考えられる。このことは、その他の実験波に対しても同様なことが認められた。表-1 は、実験により Healy の方法から求めた K_R と一次成分波による K を整理したものである。

5. 結 論

以上の実験結果から急勾配斜面による波の反射について、次のことが言える。

- (1) 反射板の断面形状・粗滑によらず、のり面勾配 $\theta=20^\circ \sim 30^\circ$ で反射率 K_R は、極値を持ち、それ以下ののり面勾配では急減する傾向がある。
また反射板は粗面の方が滑面よりも K_R は、全体的に小さくなり、断面形状は、単一勾配斜面 (Type-B) の方が合成断面 (Type-C) よりも K_R は小さくなる。
- (2) 反射板の断面形状によらず、のり面勾配 $\theta=20^\circ \sim 30^\circ$ で、打上げ高 R は極大値を持ち、極大値を持つ θ の値は、Miche の式より求められる θ_c とよく一致する。また、合成断面 (Type-C) の方が、単一勾配斜面 (Type-B) に比べて打上げ高 R は小さく、直立部を有することが、その効果と考えられる。
- (3) 波が斜面上で碎波するとき、碎波形状が Plunging Breaker の場合に、 K_R 、 R/H_0 は異常に大きくなり、この碎波形状となる θ で極値を持つと考えられる。
- (4) 実験波の波高分布より、どの地点においても高調波の影響が表われていて、特に二次成分波の影響が大きいようである。また実験より Healy の方法により求められる K_R は、一次波による K_R よりも大きく求められ、高調波の影響と考えられる。

以上、急勾配斜面を有する単純な構造物につい

て、反射率によらず諸要素の効果を主とした実験成果を述べた。今後は、逆こう配斜面、種々の合成断面などについて研究を進めたいと思っている。なお、調和解析、データ整理には、本校の電子計算機 HITAC 8250 を使用した。最後に、御討議・御協力をいただいた室蘭工業大学土木工学科河海研究室の皆様へ深く感謝します。また、実験、データ整理に協力いただいた昭和 50 年度本校卒業生、白崎昇、新田恵二、野沢和弘、昭和 51 年度本校卒業生、新正之、武田武見、前川宏二、諸君らに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 例えば、土木施設防災工法研究会編：土木施設災害復旧工法〔施工例編〕、pp.117～159、1977
- 2) 豊島修：現場のための海岸工学〔侵食編〕、森北出版、1976
- 3) 高田彰：波の遡上、越波および反射の関連性について、土木学会論文報告集第 182 号、pp.19～30、1970、10
- 4) 室田明・山田哲二：反射に関する基礎的研究、第 13 回海岸工学講演会論文集、pp.9～14、1966
- 5) 室田明：粗な斜面からの反射に関する実験的研究、第 14 回海岸工学講演会論文集、pp.45～48、1967
- 6) 合田良実：波浪に関する水理模型実験、港湾技術研究所資料、pp.37～46、1969
- 7) 土木学会編：昭和 46 年度改訂版、水理公式集、p.495
- 8) J. A. Battjes : Surf Similarity, Proc. 14th, ASCE, Coastal Eng. Conf., pp.466～480、1974
- 9) Moraes : Experiments of Wave Reflexion on Impermeable Slopes, Proc. 12th, ASCE, Coastal Eng. Conf., pp.509～521、1974
- 10) Miche, M : Le Pouvoir Reflechissant des Ouvrages Maritimes, Annales des Ponts et Chausees, May-June, 1951
- 11) C. R. Wylie : Advanced Engineering Mathematics, pp.178～208、1976
- 12) 近藤俊郎・谷野賢二：各種透過性防波構造物における波の変形特性、第 23 回海岸工学講演会論文集、pp.123～128、1976

(昭和 52 年 11 月 28 日受理)